

소규모 충적수로의 안정하상 설계방법에 관한 연구

A Study on Design Methods of Stable Bed in Small Alluvial Channels

김동현* 백중철** 허준행*** 조원철****

1. 서 론

본 연구에서는 안정하도론(regime theory)에 기초한 기존의 여러가지 안정하상의 설계방법들을 비교·검정하고 이를 개선하여 새로운 안정하상 설계방법을 수립하고자 한다. 또한, 안정상태의 소규모 충적하천 수로를 대상으로 하여 개선된 설계방법을 적용시킴으로써 대상 수로에 있어서 가장 적합한 안정하상의 산정방법을 제시한다.

Chang 이 제안한 합리법에서는 DuBoys 관계식을 유사량 공식으로서 이용하고 있으나, 본 연구에서는 소하천에서 비교적 계산 결과가 우수한 것으로 평가되고 있는 Engelund-Hansen 공식, Ackers-White 공식, 그리고 신뢰성이 보통 정도로 평가되고 있는 Yang 의 단위소류력 공식 등을 유사량 공식으로서 대치하여 합리법을 개선한다.

안정하상의 설계방법 중 Lacey, Blench, Simons-Albertson 의 안정하도법과 Chang 의 합리법, 그리고 본 연구에서 개선한 합리법을 적용하여 검정 대상에 대한 안정하상을 산정한다. 그리고, 위의 방법들을 소규모의 충적수로에 적용하여 각 방법의 결과를 실측자료와 비교 분석함으로써 대상 충적수로에 있어서 가장 적합한 안정하상 설계 방법을 제시한다.

검정 대상수로는 Chang 이 인도의 관개수로에 대하여 설계한 바 있는 사다리꼴 수로를 이용하며, 대상 충적하천으로는 국내의 소규모 지천들의 자료 분석을 통하여 안정 상태를 유지하고 있다고 판단되는 수로 구간을 선정한다.

2. 안정하도론과 설계방법 개선

안정충적수로의 설계방법은 안정하도법과 합리법으로 대별된다. 인도와 파키스탄의 관개수로 관측에 기초하여 개발된 안정하도법에서는 안정충적수로와 하천의 관측자료를 토대로 하폭, 수심, 하상경사에 대한 관계식을 이용하여 충적수로를 설계한다. 반면, 합리법에서는 동적평형하에서 흐름과 유사 이송을 이론적으로 고려함으로써 안정수로의 수리학적 형상을 산정한다.

2.1 안정하도법

먼저, Lacey 의 안정하도법은 3가지 안정하상 관계식으로 요약된다. 각 식은 흐름-저항 방정식, 안정하폭 관계식, 수로경사 관계식으로서 다음과 같다.

* 연세대학교 토목공학과 석사과정
** 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 연세대학교 토목공학과 조교수
**** 연세대학교 토목공학과 교수

$$U = 1.15 (f_L \bar{D})^{1/2} = \frac{1.346}{N_a} \bar{D}^{1/4} R^{1/2} S^{1/2} \quad (1)$$

$$B = 2.67 Q^{1/2} \quad (2)$$

$$S = \frac{f_L^{5/3}}{1830 Q^{1/6}} \quad (3)$$

여기서 U 는 유속, B 는 수로폭, S 는 수로경사, f_L 은 침전계수, N_a 는 절대조도계수, Q 는 유량, \bar{D} 는 평균수심, R 은 동수반경이다.

Blench는 이전의 안정하상 방정식을 확장해서 다른 제방 재료의 경우를 포함시켰다. Blench의 안정하도법은 3가지 독립 조건, 즉 하상계수, 사면계수, 흐름-저항 방정식으로 이루어져 있다.

$$F_b = \frac{U^2}{D} \quad \bar{B} = \left(\frac{F_b Q}{F_s} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$F_s = \frac{U^3}{B} \quad \rightarrow \quad D = \left(\frac{F_s Q}{F_b^2} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$\frac{U^2}{gDS} = 3.63 \left(1 + \frac{C_s}{2330} \right) \left(\frac{U \bar{B}}{\nu} \right)^{1/4} \quad S = \frac{(F_b)^{5/6} (F_s)^{1/2} \nu^{1/4}}{3.63 (1 + C_s/2330) g Q^{1/6}} \quad (6)$$

여기서 F_b 는 하상계수, F_s 는 사면계수, D 는 수심, \bar{B} 는 평균수로폭, C_s 는 유사농도, g 는 중력가속도, ν 는 동점성계수이다.

Simons과 Albertson은 인도와 파키스탄, 콜로라도, 네브레스카 등에서 수집한 자료를 이용, 서로 다른 5가지 종류의 수로로 나누고 그들이 제안한 계수와 멱지수값에 의해 적용하고자 하였다. Simons과 Albertson 방법 역시 안정하폭, 수심, 흐름-저항 방정식으로 구성되어 있다.

$$\bar{B} = 0.9P = 0.92B - 2.0, \quad P = K_1 Q^{0.5} \quad (7)$$

$$D = 1.21R (R < 7 \text{ ft}) \text{ 또는 } 2 + 0.93R (R \geq 7 \text{ ft}), \quad R = K_2 Q^{0.36} \quad (8)$$

$$U = K_3 (R^2 S)^{m_s} \text{ 또는 } \frac{U^2}{gd_{50} S} = K_4 \left(\frac{U \bar{B}}{\nu} \right)^{0.37} \quad (9)$$

여기서 P 는 윤편, d_{50} 은 중앙입경, K_1, K_2, K_3, K_4, m_s 는 수로형식에 따른 계수이다.

2.2 합리법

Chang이 개발한 합리법으로 수로를 설계하기 위해서는 유량, 입경, 유사농도를 결정하고 제방 재료에 근거해서 사면경사를 선정해야 한다. 일련의 중분 수로폭을 가정하여, 각 하폭에 대해서 흐름-저항식을 이용하여 시산법으로써 수심을 계산하며, 수로경사는 소류사 공식을 이용해서 계산한다. Chang이 수로경사 계산에 이용한 DuBoys 관계식은 다음과 같다.

$$Q_s = q_s b = C_d \gamma R S (\gamma R S - \tau_c) b \quad (10)$$

여기서 Q_s 는 유수량, q_s 는 단위폭당 유수량, b 는 저수로폭, γ 는 물의 단위중량, C_d 는 유사특성계수 ($= 0.173/d_s^{3/4}$), τ_c 는 한계 전단응력 ($= 0.0125 + 0.019d_s$)이다. 서로 다른 하폭에 대해 계산한 수로경사를 비교, 최소값을 선택한다. 안정수심과 하폭은 최소 소류력 개념에 의해서 최소 수로경사에서의 값이 된다.

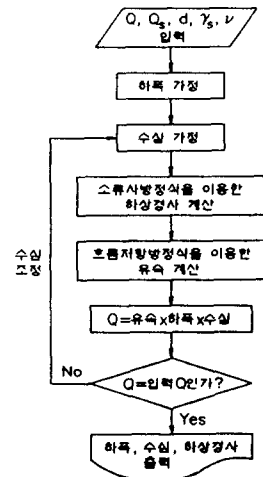


그림 1. 합리법의 계산과정

2.3 합리법의 개선

Chang의 합리법을 다음의 2가지 측면에서 개선하였다.

- ① 유사량 공식으로서의 DuBoys 관계식을 Engelund-Hansen 공식과 Ackers-White 공식, 그리고 Yang의 단위 소류력 공식으로 대체한다.
- ② Lacey의 흐름저항 방정식을 가장 일반적인 Manning의 평균유속 공식으로 대체한다.

3. 설계방법의 검정

Chang이 적용한 바 있는 사다리꼴 수로에 안정하도법과 합리법, 그리고 개선된 합리법을 적용하여 검정을 실시하였다. 적용할 사다리꼴 수로는 하폭이 18.3 m로부터 42.7 m로 점차적으로 증가하는 하도 형상으로써 총 18개 단면으로 이루어진 수로이며, 유량은 28.32 cms, 사면경사 z 는 1.5, 유사량 0.00142 cms, 중앙입경 0.300 mm이다.

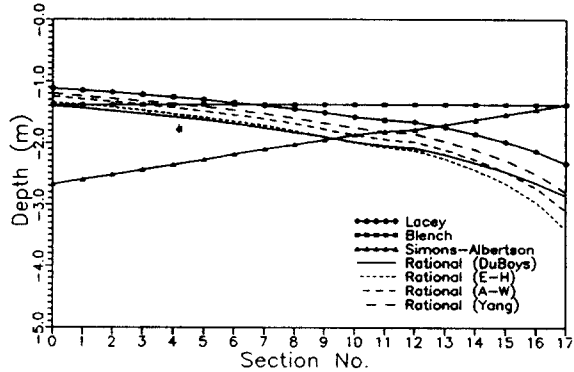


그림 2. 사다리꼴 수로에 대한 수심값

안정하도법의 경우 유량과 입경 조건

등에 단면이 결정되는 이론이기 때문에 일정하거나 편이한 결과를 나타내고 있다. 즉, 안정하도법은 주어진 수리학적 조건에 따라 새로운 소형 수로를 설계하는 데는 적합하지만 자연 하천의 안정하상을 산정하는 데는 부적합한 것으로 볼 수 있다.

계산결과 중 Lacey의 안정하도법과 합리법, 그리고 3가지 개선된 합리법이 값의 차이는 있으나 유사한 경향을 나타내었다. 개선된 합리법의 경우 Yang, Ackers-White, Engelund-Hansen의 순으로 수심값이 작게 나타내고 있는데 하폭이 커지면서 그 차이는 점차로 줄어들고 있다. 합리법과 개선된 합리법의 산정 결과는 표 1과 같다.

표 1. 사다리꼴 단면에 대한 합리법의 검정 결과

단면	수로 폭 (m)	DuBoys				Engelund-Hansen				Ackers-White				Yang			
		수심 (m)	단면적 (m ²)	경사 ($\times 10^{-4}$)	유속 (m/s)	수심 (m)	단면적 (m ²)	경사 ($\times 10^{-4}$)	유속 (m/s)	수심 (m)	단면적 (m ²)	경사 ($\times 10^{-4}$)	유속 (m/s)	수심 (m)	단면적 (m ²)	경사 ($\times 10^{-4}$)	유속 (m/s)
0	42.7	1.40	56.8	1.5681	0.49	1.34	54.4	1.8159	0.52	1.25	51.0	2.2510	0.55	1.20	49.2	2.5273	0.57
1	41.2	1.44	56.2	1.5562	0.50	1.38	53.9	1.7844	0.52	1.29	50.6	2.2100	0.56	1.24	48.7	2.4961	0.58
2	39.6	1.48	55.5	1.5449	0.51	1.42	53.4	1.7522	0.53	1.33	50.1	2.1631	0.56	1.28	48.2	2.4570	0.58
3	38.1	1.53	54.7	1.5353	0.51	1.47	52.9	1.7196	0.53	1.38	49.7	2.1279	0.57	1.32	47.7	2.4180	0.59
4	36.6	1.58	54.0	1.5252	0.52	1.53	52.4	1.6865	0.54	1.43	49.2	2.0811	0.57	1.37	47.2	2.3789	0.60
5	35.1	1.63	53.2	1.5166	0.53	1.59	51.8	1.6526	0.54	1.49	48.8	2.0342	0.58	1.42	46.7	2.3398	0.60
6	33.5	1.69	52.4	1.5097	0.54	1.65	51.3	1.6182	0.55	1.55	48.3	1.9873	0.58	1.47	46.1	2.3008	0.61
7	32.0	1.76	51.6	1.5036	0.55	1.72	50.7	1.5830	0.55	1.61	47.7	1.9404	0.59	1.53	45.5	2.2617	0.62
8	30.5	1.83	50.6	1.5003	0.55	1.81	50.2	1.5474	0.56	1.69	47.2	1.8936	0.60	1.60	44.9	2.2227	0.63
9	29.0	1.90	49.7	1.4993	0.57	1.90	49.6	1.5109	0.57	1.78	46.7	1.8467	0.60	1.68	44.3	2.1836	0.63
10	27.4	1.99	48.7	1.5023	0.58	2.00	49.0	1.4739	0.57	1.87	46.1	1.7998	0.61	1.76	43.7	2.1367	0.64
11	26.5	2.05	48.0	1.5065	0.59	2.08	48.6	1.4514	0.58	1.94	45.8	1.7646	0.61	1.82	43.3	2.1133	0.65
12	25.9	2.09	47.6	1.5103	0.59	2.13	48.3	1.4362	0.58	1.99	45.5	1.7471	0.62	1.86	43.0	2.0977	0.65
13	24.4	2.20	46.4	1.5251	0.61	2.27	47.7	1.3976	0.59	2.12	44.9	1.7002	0.63	1.98	42.4	2.0508	0.66
14	22.9	2.33	45.1	1.5505	0.62	2.45	47.0	1.3587	0.60	2.28	44.3	1.6475	0.64	2.12	41.7	2.0039	0.67
15	21.3	2.48	43.7	1.5912	0.64	2.67	46.3	1.3195	0.61	2.48	43.7	1.5947	0.64	2.29	41.0	1.9570	0.69
16	19.8	2.66	42.1	1.6578	0.67	2.97	45.6	1.2802	0.62	2.74	43.0	1.5479	0.65	2.51	40.3	1.9102	0.70
17	18.3	2.87	40.2	1.7690	0.70	3.41	45.0	1.2425	0.63	3.11	42.4	1.4951	0.66	2.81	39.5	1.8633	0.71

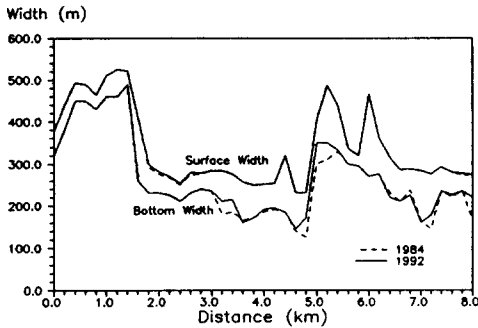


그림 3. 달천의 횡단면 변화

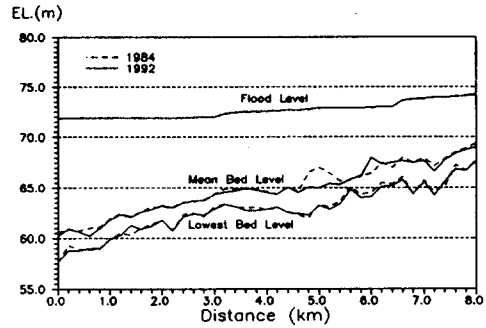


그림 4. 달천의 종단면 변화

4. 자연 증적수로의 적용

4.1 대상 하천의 분석

대상 하천은 본 연구에서 적용할 수 있는 비교적 소규모의 지천으로서 일정기간 동안 하상의 변동이 아주 작거나 거의 없어 안정 상태로 판단될 수 있는 곳을 선정하였다. 80년대와 90년대 자료를 중심으로 구간별로 하폭이나 저수로폭, 홍수위 그리고 하상고를 비교하여 횡단 및 종단 방향의 변화를 분석해 본 결과, 충북의 남한강 지류인 달천(達川)은 횡단면 변화는 몇몇 구간을 제외하고는 거의 없었으며 종단면 변화 역시 인위적인 세굴이 많았을 뿐 자연적인 세굴이나 퇴적이 있는 곳은 몇 구간 되지 않았다. 구간 선정을 위해 달천에서 수집한 자료와 연관성이 있는 단면을 찾아보았는데, 유사량 자료는 하류부 No.0 지점에서 측정된 것이며, 하상고의 변동량이 0인 지점을 그 하천의 안정하상고를 산정하는 기준점으로 하게 되는데 달천의 경우 기준점으로 하류부 No. 20 단면을 택하고 있다. 따라서 본 연구에서는 달천의 하류부 No.0 지점으로부터 No.40 지점의 8 km 구간을 대상 수로로서 선정하기로 하였다. 1984년과 1992년의 하류부의 횡단 및 종단 변화에 대한 비교는 그림 3과 4에 표시하였다.

4.2 자연 하천의 안정하상 산정

검정 결과와 기본 조건을 토대로 분석해 볼 때, 안정하도법은 기존 수로의 산정시 도입 불가능한 부분과 함께 적용 유량의 한계성으로 인해 자연 하천에는 적용할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 대상 증적수로에는 합리법과 개선된 합리법을 적용하였다.

자연 하천의 단면은 기하학적으로 매우 불규칙한 형상을 이루고 있으나, 수심에 비하여 하폭이 그다지 넓지 않은 중소하천의 경우에는 하천 단면을 사다리꼴로 근사화하여 해석할 수 있다. 합리법에서는 사다리꼴에 의해 단면을 산정하도록 되어 있으므로, 각 단면의 하폭과 저수로폭을 고려하여 사다리꼴 수로로 근사화한 후 안정하상을 산정하였다.

하폭이 계획하폭인 300 m를 훨씬 넘는 구간에서는 Yang 공식을 이용한 합리법이 가장 적절한 것으로 산정되었고, 하폭이 300 m 미만인 구간에서는 Engelund-Hansen 공식을 이용한 합리법이, 300 m 전후에서는 Ackers-White 공식을 이용한 합리법이 실제 하상고와 유사한 값을 보였다. 검정 과정에서 Engelund-Hansen 공식, Ackers-White 공식, Yang 공식 순으로 단면적·수심을 적게 산정한 것을 볼 수 있었다. 비교적 단면적·수심을 크게 산정했던 Yang 공식을 이용한 합리법이

표 2. 산정 하상고와 실제 하상고

단면	하폭 (m)	산정 하상고 (EL.m)				최심 하상고 (EL.m)	평균 하상고 (EL.m)	단면	하폭 (m)	산정 하상고 (EL.m)				최심 하상고 (EL.m)	평균 하상고 (EL.m)
		D	E-H	A-W	Y					D	E-H	A-W	Y		
0	378	62.52	62.54	60.76	58.96	57.70	60.24	21	253	64.15	63.79	61.54	60.44	64.34	64.34
1	439	63.38	63.48	61.86	60.64	58.80	60.91	22	320	64.40	63.86	61.84	63.81	65.05	65.05
2	494	64.05	64.21	62.74	61.98	58.80	60.59	23	230	61.44	60.80	57.30	62.54	64.49	64.49
3	490	63.85	64.00	62.47	62.06	59.00	60.22	24	230	60.54	60.10	55.44	64.24	65.05	65.05
4	464	63.35	63.48	61.83	61.80	59.00	60.96	25	406	62.07	61.71	59.89	61.84	64.98	64.98
5	511	63.64	63.72	61.99	62.51	59.90	61.79	26	487	66.01	65.95	63.55	67.31	65.41	65.41
6	525	64.24	64.38	62.52	62.30	60.30	62.34	27	440	66.61	66.48	64.64	66.36	65.32	65.32
7	522	64.76	64.99	63.14	62.31	61.30	62.07	28	335	66.31	66.15	64.31	63.85	65.85	65.85
8	409	62.80	62.50	59.84	57.29	60.90	62.55	29	320	66.69	66.43	64.55	61.97	66.17	66.17
9	298	61.67	61.62	58.61	56.00	61.20	62.80	30	466	67.88	67.31	65.81	64.46	68.05	68.05
10	281	61.49	61.39	58.32	55.23	61.80	63.19	31	360	67.23	66.79	65.02	62.36	67.36	67.36
11	270	61.48	61.40	57.89	64.67	60.70	63.01	32	315	66.36	65.84	63.71	61.05	67.51	67.51
12	253	61.18	61.06	56.99	64.15	62.10	63.50	33	286	66.53	66.03	63.73	61.22	67.71	67.71
13	280	62.15	62.07	58.01	64.61	62.40	63.70	34	288	66.72	66.30	64.05	61.69	67.51	67.51
14	278	62.43	62.41	58.12	64.61	62.26	63.73	35	284	65.88	65.15	62.54	59.98	67.72	67.72
15	284	62.62	62.56	57.99	64.44	62.90	64.32	36	276	65.89	65.31	62.95	60.52	66.66	66.66
16	284	63.32	63.08	59.64	63.75	63.30	64.53	37	293	66.53	66.24	64.39	62.14	67.77	67.77
17	276	64.21	63.94	61.20	62.92	63.10	64.64	38	280	66.08	65.82	64.10	63.87	68.44	68.44
18	257	63.61	62.99	60.19	59.34	62.70	64.95	39	277	65.94	65.77	64.33	65.34	68.76	68.76
19	249	64.00	63.45	60.78	59.59	62.70	64.78	40	274	65.48	65.29	64.12	65.58	69.03	69.03
20	251	64.48	64.03	61.78	60.24	62.80	64.50								

하폭이 큰 구간에서 그 단면적에 접근할 수 있었고, Engelund-Hansen 공식을 이용한 합리법의 경우 Chang 의 합리법과 함께 하폭이 좁은 구간에서도 그 단면적에 접근한 것이다.

사다리꼴 단면으로 가정하기에 무리라고 예상되었던 몇몇 지점에서는 어느 정도 차이가 났다. 그러한 구간의 경우에는 최심하상고와 함께 평균하상고를 고려하여야 한다. 자연적·인위적인 세굴이 일어났던 No.0 지점을 기준으로 0.6, 4.4, 6 km 지점에서는 합리법에 의해 산정된 값이 예상대로 최심하상고 보다 크게 나타났다. 그러나 입경 자료를 보정해서 사용한 관계로 하상고가 과대 혹은 과소 산정된 지점도 눈에 띄었다.

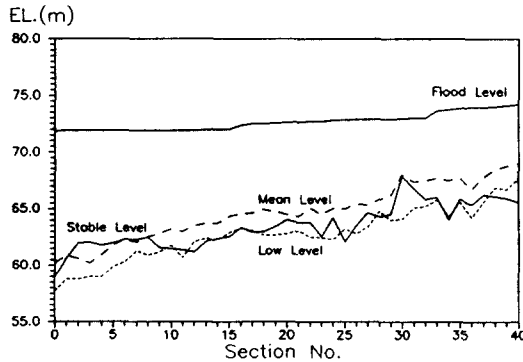


그림 5. 개선된 합리법에 의한 하상고 산정

5. 결 론

본 연구에서 안정하도법, 합리법, 개선된 합리법을 비교·검정하고 안정 상태의 자연 충적수로에 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 안정하도법은 관개수로의 설계를 배경으로 하여 발전된 만큼 소형 수로를 설계하는 데는 이론적 근거가 타당하지만, 실제 유량이 관개수로보다 훨씬 큰 자연 하천에서 안정하상을 산정하는 데는 부적합한 것으로 판단된다.
- ② 이상적인 사다리꼴 수로에 대해서 검정해 본 결과, 합리법에 의해 안정하상을 산정하는 데는 특정 방법이 아닌 구간에 따라 하폭을 비롯한 대상 수로의 조건에 따라 다른 유사량 공식을 이용한 방법으로서 산정하는 유연성 있는 설계법이 요구된다.
- ③ 자연 충적수로 대해서 적용해 본 결과, 계획하폭보다 비교적 넓은 구간에서는 Yang 공식을 이용한 합리법이 가장 적절한 것으로 산정되었고, 하폭이 좁은 구간에서는 Engelund-Hansen 공식을 이용한 합리법이, 계획하폭과 비슷한 구간에서는 Ackers-White 공식을 이용한 합리법이 가장 적절한 것으로 볼 수 있다.

앞으로 계속 연구되어야 할 사항으로는 사다리꼴 단면으로 무리하게 적용시키기 힘든 단면이 있었던 점을 감안, 실제 단면을 적용시켜 안정하상을 산정하는 방법이 도입되어야 할 것이다. 또한, 합리법 이외에도 안정하상을 산정하기 위한 좀 더 다양한 방법들이 제시되어야 하며, 실제 산정시에도 어느 한 방법이 아닌 여러가지 방법에 의한 산정과 분석이 이루어져야 하겠다.

6. 참고문헌

1. 건설부, 한강 하천정비 기본계획(달천·문산천), 1984.
2. 건설부, 침미천·복하천·달천·문산천 하상변동 조사보고서, 1992.
3. 한국건설기술연구원, "하천 유사량 공식의 선정 기준", 연구보고서, 1990.
4. 한국건설기술연구원, "하상변동 예측모형의 비교분석", 연구보고서, 1991.
5. 한국건설기술연구원, "평형하상경사 추정방법의 개발", 연구보고서, 1993.
6. Ackers, P. and White, W. R., "Sediment Transport: A New Approach and Analysis", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY11, 1973.
7. Chang, H. H., "Stable Alluvial Canal Design", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, No. HY5, 1980.
8. Chang, H. H., "Design of Stable Alluvial Canals in a System", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 1, 1985.
9. Chang, H. H., Fluvial Processes in River Engineering, John Wiley & Sons, N. Y., 1988.
10. Garde, R. J. and Ranga Raju, K. G., Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems, John Wiley & Sons, N. Y., 1985.
11. Yang, C. T., "Unit Stream Power and Sediment Transport", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 98, No. HY10, 1972.
12. Yang, C. T., "Incipient Motion and Sediment Transport", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY11, 1973.